

論文 ひび割れを抑制した大型中空円筒形RC構造物の透水性状

小西 一寛^{*1}・辻 幸和^{*2}・渡辺 邦夫^{*3}・藤原 愛^{*4}

要旨：温度ひび割れを抑制した中空円筒形RC構造物の初期透水性を評価するために、外径6.0m、壁厚1.0m、壁高6.0mの大型試験体を作製し0.2MPaの外圧注水実験を行った。湿潤ベンチレーション法による5年間の透水実験中、浸出側の側壁内面にひび割れや水平打継目が少し剥離したものの、浸出側の閉鎖空間湿度は側壁一般部のみならず水平打継目部でさえ上昇しなかった。このことから、試験体の水密性は高いことを確認した。ここで、一般的に加圧側の初期注水量は浸出側の定常透水量より大きいと見なされている加圧注水法により、中空円筒形RC構造物全体の初期平均透水係数は、 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{m/s}$ オーダ以下と評価した。
 キーワード：中空円筒構造物、透水実験、湿潤ベンチレーション法、加圧注水法、透水係数

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物（以降、RC構造物と表示する）で作製した廃棄物処分施設を低透水材料の1つとして利用するために、温度ひび割れの制御水準の異なる大型中空円筒形のRC構造物を施工し、その初期透水性を評価する透水実験を実施してきた^{1)~3)}。その中で、低熱ポルトランドセメントの使用等の温度ひび割れ対策により、施工時の温度ひび割れを防止した中空円筒形RC構造物試験体を構築した²⁾。

その透水実験では、試験体外側の湛水を0.2MPaで加圧し、試験体内側への浸出水量を透水径路別に測定することにした。そのために、各浸出面を観測窓で覆い、浸出水により内部空間が飽和したら、換気に含まれる水蒸気量を測

定する湿潤ベンチレーション法を適用することにした³⁾。

5年間の透水実験中、厚さ1.0mの試験体側壁内・外の乾燥収縮及び吸水膨潤が主原因と思われる表面ひび割れが発生したが、側壁コンクリートを透過する水分が測定されなかったことについて報告する。

2. 中空円筒形RC構造物の構築概要

2.1 試験体の構造

RC構造物の透水性を評価するために試験体は、温度ひび割れ等の構造物レベルの透水径路形成に必要な条件を満足するように、図-1に示す外径6.0m、壁厚1.0m、壁高6.0mの中空円筒形の大型試験体とした。

表-1 試験体コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スラブ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
					水(W)	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	石灰石微粉末(LF)	高性能AE減水剤
20	15±2.5	41.3	4.5±1.5	44.0	165	400	736	980	50	4.05

注：加圧水槽の高性能AE減水剤は4.95 kg/m³

*1 株式会社大林組 土木技術本部技術課長 (正会員)

*2 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 埼玉大学大学院教授 地圏科学研究センター 工博

*4 原子力環境整備促進・資金管理センター プロジェクトマネージャー 工修

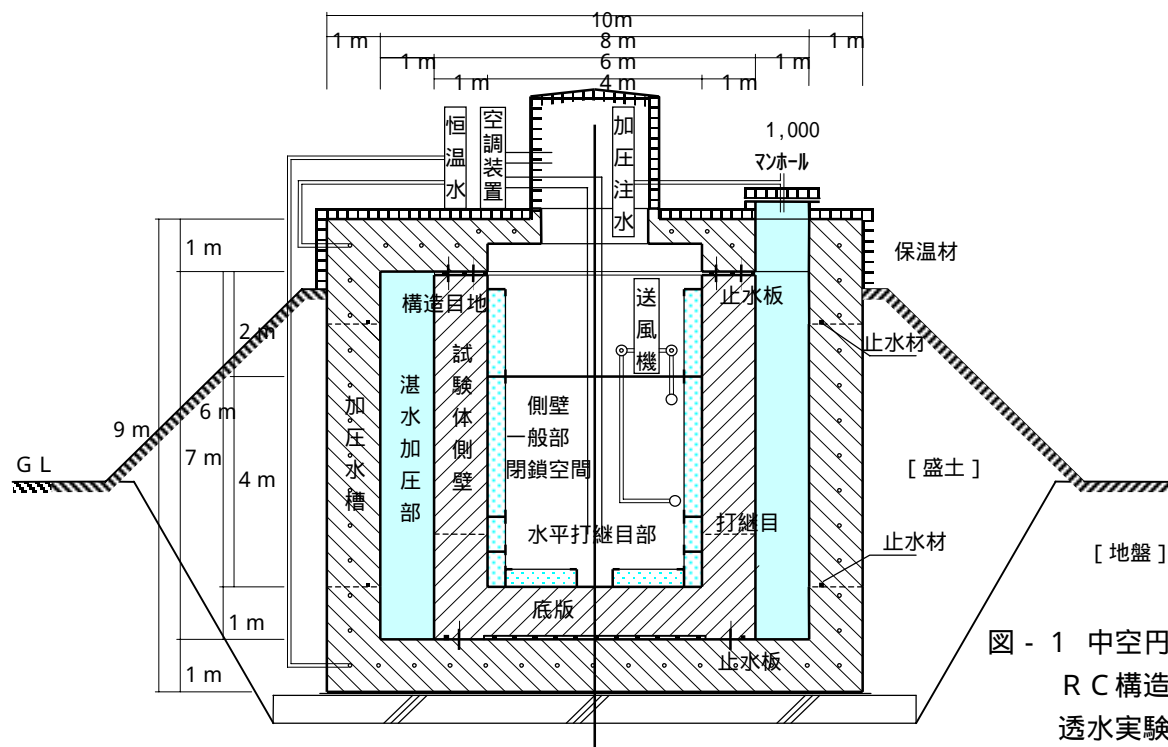


図 - 1 中空円筒型 RC 構造物の 透水実験概要

2.2 コンクリート材料

施工時のひび割れを抑制するため、セメント種類別の断熱温度上昇と自己収縮試験を行い、ピーライトを 58% 含む低熱ポルトランドセメントを選定した。試験体の配合を表 - 1 に示す。

コンクリートの配合条件は水密性および耐久性の向上のために、単位セメント量を 400kg/m^3 とし、材齢 91 日の設計基準強度を 40N/mm^2 に設定した。また、材料分離とブリーディングの低減および水密性の向上のために、石灰石微粉末を 50kg/m^3 混入した。

試験体施工時に作製した $150 \times h150\text{mm}$ の標準養生供試体を用い、インプット法の透水試験を行った。加圧注水は 1.0MPa で 48 時間とし、浸透深さ法による試験結果を表 - 2 に示す。

表 - 2 コンクリート単体の透水試験結果

材齢 (日)	浸透深さ (cm)	拡散係数 D (cm^2/s)	透水係数 k (m/s)
29	2.35	10.5×10^{-4}	10.5×10^{-14}
85	1.99	7.5×10^{-4}	7.5×10^{-14}
182	2.23	9.5×10^{-4}	9.5×10^{-14}
365	1.50	4.3×10^{-4}	4.3×10^{-14}
730	0.86	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-14}

注: D (cm^2/s) から k (m/s) への換算は 10^{-10} 倍⁴⁾

2.3 試験体の施工と養生

試験体施工に先立ち、模擬形状の加圧水槽を事前施工し、温度・温度応力シミュレーションを行った。同じ手法により試験体の温度ひび割れ指数を事前計算し、試験体全体で 2.0 以上となるように、温度ひび割れ対策としてプレクーリングや断熱湿潤養生を追加して施工した²⁾。

施工後、試験体表面にひび割れは観察されなかった。また、透水試験の対象となる試験体の打継目には、効果が明確でない止水材を用いなかったが、内部湛水しても漏水は観察されなかった。さらに、温度ひび割れ指数は施工後のシミュレーション解析により、試験体水平打継目上部の側壁中央で 4.6、側壁表面で 2.2 と算定された²⁾。したがって、低熱ポルトランドセメントを使用し、プレクーリングおよび断熱湿潤養生等の温度ひび割れ対策を追加した試験体は、施工後の温度応力計測、ひび割れおよび漏水の目視調査においてひび割れ発生を示すデータはなく、温度ひび割れを防止できたと判断した²⁾。なお、施工実験終了から透水実験準備までの約半年間は、試験体の内外に湛水し、試験体コンクリートの飽和につとめた。

3. 中空円筒形 R C 構造物試験体の透水実験

3.1 測定方法

(1) 加圧注水量測定

加圧注水試験では、加圧側の注水量を正確に測定するために、試験体と加圧水槽間の湛水部内空積の変動要因である試験温度と試験圧力を一定にする必要がある¹⁾。図 - 1 に示すように、試験温度は一定に保つため、試験体の外側に設置した加圧水槽の躯体内には埋設配管に恒温水を循環するとともに、周囲を盛土で覆った。試験圧力は、加圧水槽に内圧として作用するために、引張応力が引張強度の 1/3 となるように 0.2MPa 一定とした。

(2) 透水量測定

本試験では、試験体を一般部や打継目部等の透水経路別に分けて透水量を測定するために、浸出側に湛水し水位測定する飽和透水試験は、実現不可能であった。また、大型試験体の広い壁面から僅かな浸出水を漏れなく集水するのも困難なことから、浸出水を水蒸気に変えて収集するベンチレーション法を検討することにした。ベンチレーション法は、岩盤空洞壁面に浸出した水量を測定する手段として、浸出水をいったん空洞内に蒸発させ、外部の低湿度空気と換気する際の送・排気の水蒸気量差を測定する方法である⁵⁾。

a) 湿潤ベンチレーション法

ベンチレーション法により測定される浸出水量を飽和透水量に近づけるためには、浸出面は可能な限り湿潤にすることが必要である。そこで、ベンチレーション法の換気を断続的に行うことにより、浸出水により浸出面を湿潤状態に維持することを狙った(以降、湿潤ベンチレーション法と表示する)。そこで図 - 2 に示すように、浸出面を観測窓で覆い、試験体から浸出した水蒸気により閉鎖空間を高湿にする循環運転と、飽和した閉鎖空間を送・排気の水蒸気量差により測定する換気運転を、交互に繰り返す。なお、湿潤ベンチレーション法の妥当性は、事前に小

型試験体を用いた透水試験³⁾により確かめた。

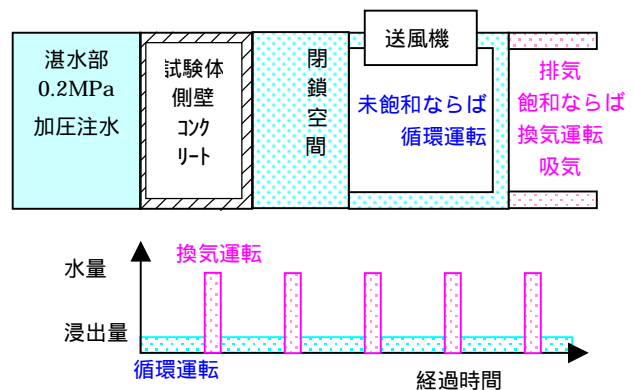


図 - 2 湿潤ベンチレーション法の測定概念

b) 蒸発量測定法

浸出側に湛水しないで壁面からの浸出量を測定する方法として、蒸発量測定法が提案されている⁵⁾。この方法は図 - 3 に示すように、壁面から 1cm 以内の離れた 2 点に各々温度・湿度計を設置し、壁面近傍の絶対湿度勾配を測定することにより、壁面から気化する水蒸気量を推定する方法である。

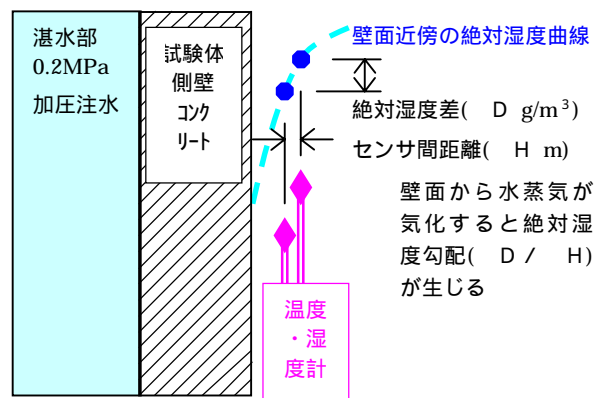


図 - 3 蒸発量測定法の測定概念

3.2 透水実験中に生じたひび割れ

(1) 加圧水槽頂版のマンホール周りひび割れ

試験体の外側に設置した加圧水槽の頂版には、湛水部へ出入りするマンホールを 4 箇所設けたが、透水実験初年度の夏期に、頂版内側方向にひび割れが全て発生し漏水した。温度制御した

加圧水槽側壁と試験体にはひび割れが発生しなかったことから、発生原因は、マンホール部の頂版欠損および外気温変動による上下面温度差と考えられた。このため、温度緩和対策として頂版上に保温材を敷き、夏期には日除けで覆い散水した。なお加圧水槽は本透水実験の対象でないことから、ひび割れにはエポキシ樹脂を注入し、透水実験を継続した。

この後、ひび割れからの漏水量は減少したものの、毎年夏期には水が滲んだ。このことは、貫通したひび割れに繰返し同様な荷重が作用すると、エポキシ樹脂の注入やエフロッセンスの析出だけでは短期間に止水しにくく、貫通ひび割れを避けることの重要性を再認識した。

(2) 試験体側壁内面のひび割れ

透水実験開始から4年(試験体施工から5年)が経過し、側壁内面にひび割れが発見された。側壁内面は透水実験用の観測窓で覆われており、目視できた側壁下部のひび割れを図-4に示す。

ひび割れは、水平打継目より上方の側壁に狭い間隔に分布した。観測窓の一部を取り外し目視調査すると、ひび割れ幅は平均0.12mm程度で水平打継目も表面剥離していたが、漏水しないことから非貫通と推定される。外的荷重が変動しないにもかかわらず、ひび割れが経時的に漸増したことから、ひび割れ発生原因の1つには、透水実験中の側壁内・外の乾燥収縮や吸水膨潤等の内的荷重による可能性が考えられる。

3.3 透水実験結果

5年間に及ぶ大型の中空円筒形RC構造物の透水実験結果を、図-5に示す。

(1) 注水量測定

湛水への注水量は、初期の10cm³/minオーダから2年後には1cm³/minオーダまで漸減し、その後はほぼ一定となった。透水実験5年間の総注水量は3.2m³であるが、加圧水槽頂版マンホール周りのひび割れ等からの漏水も含み、コンクリート一般部への注水量はそれより少ない。

(2) 透水量測定

図-6に示すように、側壁内面を観測窓によりコンクリート一般部や水平打継目部に分けて、閉鎖空間を設置した。外部環境温度18℃での飽和絶対湿度は15.3g/m³で、相対湿度70%RHでは10.7g/m³に相当するが、閉鎖空間内部の絶対湿度の上昇は、水平打継目部を含め5年間測定されなかった。また、試験体側壁からの蒸発量を数十箇所測定したが、壁面近傍の絶対湿度勾配は水平打継目部を含め測定されなかった。以上の透水量測定から、厚さ1.0mの試験体側壁コンクリートは、水分を透過していないと推定された。

水分が透過しない理由の1つとして、5年間の総注水量が試験体と加圧水槽の総コンクリート量477m³の0.67%にすぎないことから、例えば全量がコンクリート一般部に注水しても、内部空隙に保水された可能性が考えられる⁶⁾。

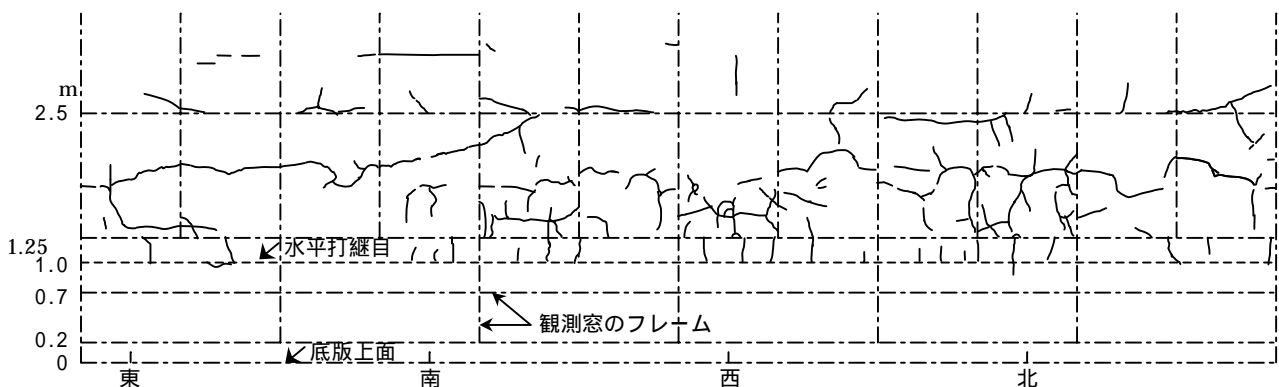


図-4 試験体側壁下部内面(内径4.0m)のひび割れ分布展開

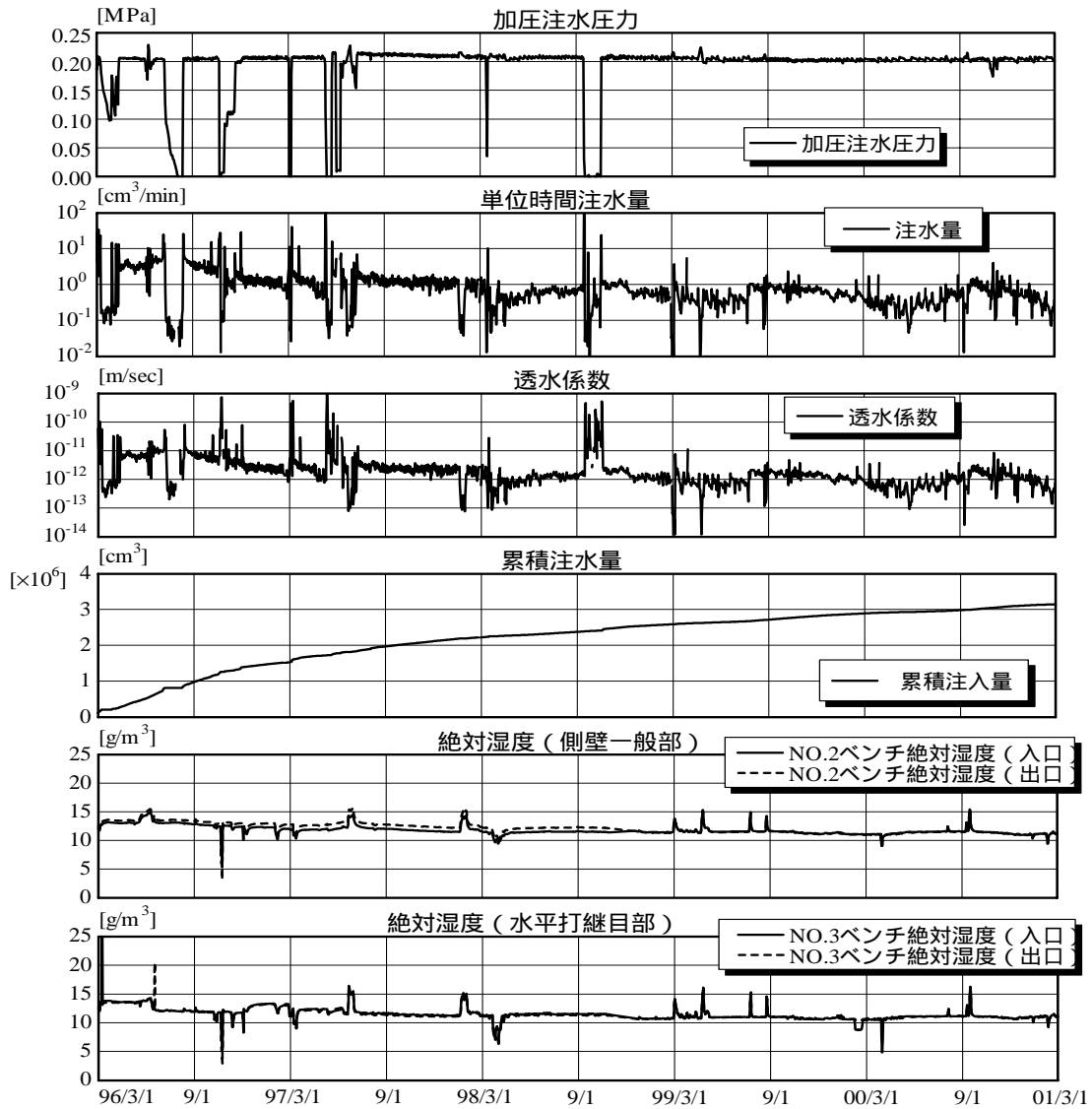


図 - 5 大型試験体の透水実験結果(5年間)

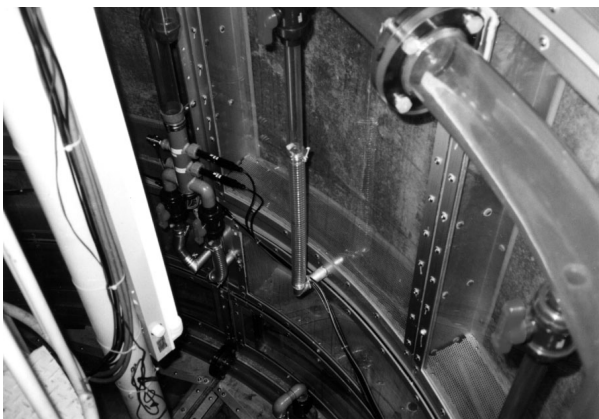


図 - 6 試験体側壁内面の測定装置設置状況

(3) 側壁コンクリートの含水率分布調査

側壁内の含水率分布を明らかにするため、透

水実験中に、側壁内側から 5cm で 80cm の深さまで削孔したコンクリート試料を厚さ 5cm に小割し、含水率の測定結果を図 - 7 に示す。ここでは、試料採取後の真空脱気前後の試料質量差を空隙量、引き続き行った絶乾前後の質量差を有効空隙量、両者の差を含水量とした。

この結果、側壁内面から 80cm までは未飽和領域であり、浸透領域は未削孔の側壁外面から 20cm のコンクリート内にあると推定された。また、未飽和領域には浸透水を保水可能な空隙が存在することから、透水実験において、側壁コンクリートが水分を透過しない測定と矛盾しない結果が得られた。

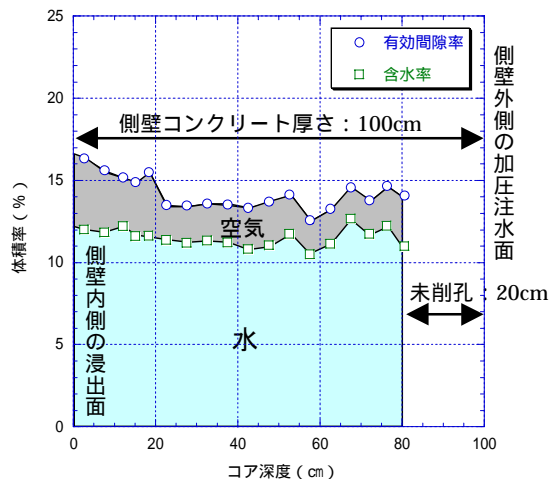


図 - 7 試験体側壁一般部の含水率分布

4. 加圧注水法による透水係数の評価

加圧注水法は、透水実験において定常透水量が得られない場合、それより大きいと見なされる初期注水量により、平均透水係数を評価する方法である。ここでは、試験体と加圧水槽全体を均質な R C 構造物と仮定し、初期平均透水係数を式(1)により評価すると図 - 5 に示すように、 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{m/s}$ オーダ以下と推定される。

$$k = \frac{q}{A \cdot i} = \frac{L \cdot q}{A \cdot H} = \frac{1 \times q}{399 \times H} \quad (1)$$

ここで、 k : R C 構造物の平均透水係数(m/s)
 q : 加圧注水量(m^3/s)で測定する
 A : 透水面積(m^2)で形状が複雑な場合、
 F E M定常解析で L / A を算定
 L : 透水長でほぼ躯体厚さ 1.0(m)
 H : 平均水頭(m)で測定する

5. まとめ

温度ひび割れの防止を目標とした試験体を施工し、目視観察や応力計測により施工時の温度ひび割れ防止を確認した。さらに試験体側壁の一般部や打継目部に透水性を評価するために、浸出水を水蒸気とし測定する透水実験を行った。

得られた知見を以下にまとめる。

(1)水セメント比 41.3%の厚さ 1.0m の中空円筒形 R C 構造物試験体に 0.2MPa で 5 年間加圧注水したが、水平打継目でさえ水分の透過は

測定されなかった。

- (2) また、側壁浸出側表面で絶対湿度勾配が生じないこと、さらに側壁浸出側から 0.8m まで未飽和なことから、厚さ 1.0m の側壁コンクリートの初期水密性を確認した。
- (3) 水分が透過しない理由の一つとして、5 年間の総注水量が総コンクリート量の 0.67% と少なく、全てコンクリートに浸透しても、内部空隙に保水された可能性が考えられる。
- (4) 初期注水量は定常透水量より大きいと見なす加圧注水法により、貫通した止水欠陥のない中空円筒形 R C 構造物の初期平均透水係数は、 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{m/s}$ オーダ以下と推定した。

謝辞:この研究をまとめるにあたり、(財)原子力環境整備促進・資金管理センターに設けられたコンクリート構築物止水性能評価検討委員会の委員の方々から、貴重なご助言を頂き深く感謝致します。

参考文献

- 1) 小西一寛,辻 幸和,伊藤 洋,藤原 愛: 中空円筒形鉄筋コンクリート構造物を対象とする加圧注水型透水試験方法の提案,土木学会論文集, -43, No.623, pp.163-176, 1999.6
- 2) 小西一寛,竹田宜典,入矢桂史郎,藤原 愛,辻 幸和: 中空円筒構造物の温度ひび割れの防止施工実験と温度応力解析の適用性について,土木学会論文集, -32, No.544, pp.141-154, 1996.8
- 3) 須藤 賢,丹生屋純夫,小西一寛,藤原 愛,渡辺 邦夫: 湿潤性を配慮したベンチレーション試験法による透水性評価について,地盤工学研究発表会論文集, Vol.31, No.2, pp.2089-2090, 1996.7
- 4) 岩崎訓明: コンクリートの特性,コンクリートセミナー 1, 共立出版, pp.140-142, 1979.10
- 5) 渡辺邦夫,藍沢稔幸,小野 誠,柳沢孝一,佐久間秀樹,山本 肇,神田信之: 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定(その 1),応用地質, Vol.30, No.4, pp.11-18, 1989.4
- 6) 小西一寛,中畑昭彦,山本修一,辻 幸和: コンクリートの長期飽和透水性状,コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.805-810, 2000.6